

MODELAÇÃO MATEMÁTICA DO IMPACTO DE CAUDAIS DE CHEIA NAS CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO FLUVIAL. UM CASO DE ESTUDO.

António Sampaio Duarte ¹, José Luís Pinho ¹, Paulo Jorge Ramisio ¹, José Pereira Vieira ¹

Resumo - A previsão de situações de cheia é uma tarefa difícil devido quer à incerteza associada aos caudais de cheia afluentes durante a propagação da onda de cheia, quer à complexidade e variabilidade das características geométricas dos leitos de cheia.

O presente trabalho teve como objectivo avaliar o impacto da construção duma plataforma, que ocupará parcialmente o leito de cheia de um trecho do Rio Este, no comportamento hidráulico desse rio e na configuração das zonas anteriormente inundáveis. No estudo hidrológico foram utilizados vários métodos para estimar os caudais de cheia, face à exiguidade dos registos disponíveis relativos a precipitações e caudais. A análise efectuada baseou-se na previsão de alturas de água e velocidades resultante da aplicação dum modelo hidrodinâmico bidimensional (2D-H) na simulação de diferentes cenários de cheia. Na delimitação das áreas inundadas recorreu-se a técnicas dos Sistemas de Informação Geográfica integradas no ambiente hidroinformático utilizado. Os resultados obtidos mostraram que a execução do aterro proposto terá um impacto diminuto no comportamento hidrodinâmico deste trecho. A metodologia aplicada revelou-se muito útil para a previsão e mitigação dos impactos de situações de cheia, aspecto relevante para a gestão integrada da bacia hidrográfica.

Abstract – Flood prediction is a very difficult task due to either river discharges uncertainty during flood propagation and complexity of flood channel geometric characteristics. Mathematical modelling is a efficient tool that can be used to predict the hydraulic behaviour of rivers during floods. The aim of this work was to assess the impacts of a platform that partially occupies the flood channel of a river Este section on river hydrodynamics and on previous flooded areas. Several methods to estimate the flood discharges at the upstream point of the river section were applied and a hydrodynamic two-dimensional finite element model, with wet and dry capabilities, was implemented in order to predict water depths and currents velocities, considering different flood

¹ Depto. de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal, +351604720, + 351604721, aduarte@civil.uminho.pt

scenarios. Flood mapping was processed recurring to Geographical Information System techniques supported by the hydroinformatic environment used. Results showed that the channel modification due to the platform construction have a minimum impact in the hydraulic behaviour of the river section. The general methodology applied appears to be very efficient in the flood propagation analysis and prediction, allowing to implement a better river basin integrated management.

Palavras-chave – mitigação de impactos, modelação matemática, Rio Este, gestão de recursos hídricos.

INTRODUÇÃO

O presente artigo refere-se a uma das componentes *do Estudo de Incidências Ambientais e de Minimização dos Impactos Negativos do Mercado Abastecedor da Região Norte (MARN)* (Vieira et al., 2001), em construção no município de Braga (Noroeste de Portugal), junto da actual ligação da E.N. 14 ao nó “Braga Sul” da auto-estrada A3 (Porto–Valença), num terreno atravessado pelo Rio Este, a jusante da Zona Industrial de Celeirós (Figura 1). Esse Estudo tinha como objectivos a avaliação de incidências ambientais decorrentes da instalação e funcionamento deste Mercado Abastecedor e a proposta de medidas mitigadoras dos seus eventuais impactos negativos, no sentido de salvaguardar os princípios estabelecidos na Lei de Bases do Ambiente.



Figura 1 – Localização do empreendimento

Neste trabalho apresenta-se uma síntese dos estudos hidrológico e hidráulico efectuados nesse âmbito, dado que entre os problemas mais importantes, resultantes da industrialização/urbanização de solos agrícolas e florestais, surgem os relativos à água, enquanto recurso vital e poderoso agente ambiental, nomeadamente no que se refere quer à preservação da sua quantidade e qualidade, quer à redução dos danos causados por cheias, erosão e deposição de material sólido (Thomas and Schneider, 1970).

O estudo hidrológico iniciou-se com a recolha e o tratamento dos dados disponíveis referentes a esta bacia hidrográfica (INAG-SNIRH, 2000), no sentido de se proceder a uma avaliação dos caudais de cheia através da aplicação de métodos empíricos, estatísticos e cinemáticos.

Após a definição de vários cenários hidrodinâmicos, baseada nos valores obtidos para os caudais de cheia, efectuou-se uma análise hidráulica visando a comparação dos respectivos impactos nas situações anterior e posterior à construção da plataforma na margem esquerda do leito maior do Rio Este. Nesta análise, recorreu-se a modelos de simulação de escoamentos em superfície livre com regime variado para estimar quer as velocidades do escoamento, quer as cotas de inundação, atendendo à morfologia e às condicionantes hidráulicas do trecho em estudo. Os resultados obtidos foram tratados recorrendo-se a técnicas do Sistema de Informação Geográfica integrado no ambiente hidroinformático desenvolvido, de modo a obter-se um mapeamento das áreas inundadas e dos respectivos campos de velocidade observados.

DESCRIÇÃO SUMÁRIA DO EMPREENDIMENTO

A instalação de Mercados Abastecedores insere-se num programa nacional de modernização e reestruturação do comércio agro-alimentar, de ordenamento urbano e de desenvolvimento regional, que visa a melhoria sustentada dos circuitos comerciais existentes, potenciando a valorização, a organização e o escoamento da produção agrícola regional.

O MARN terá como área de influência os distritos de Braga e Viana do Castelo, abrangendo vinte e dois concelhos e servindo uma população estimada de cerca de 1,1 milhões de habitantes. Este equipamento ficará instalado num terreno com cerca de 30 ha, sendo a área de implantação de 10 ha situada na sua zona norte/nascente e distribuída por duas plataformas com um desnível de 7 m. O Mercado será composto por quatro pavilhões destinados à instalação de produtores e grossistas do sector agro-alimentar, de armazenistas e distribuidores, complementados por dois edifícios de apoio. Está prevista a construção de uma Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) e a instalação dum sistema de recolha e valorização dos resíduos sólidos.

ÁREA DE ESTUDO

O Rio Este é um afluente da margem direita do Rio Ave e tem um comprimento de 52,4 km. O território drenado pela bacia hidrográfica do Rio Ave distribui-se pela jurisdição de 14 concelhos, dos distritos de Braga e do Porto.

A bacia hidrográfica do Rio Este (Figura 2a) insere-se numa região montanhosa, apresenta uma forma alongada e possui uma área total de cerca de 260 km².

A bacia hidrográfica na secção em estudo (Figura 2b) apresenta uma área total de 65 km², um perímetro de 44 km e um comprimento de aproximadamente 18 km, desde a sua nascente (à cota 572 m) até àquela secção (à cota 117 m). É constituída por dois cursos de água principais – o Rio Este e o Rio Veiga – com a confluência situada a cerca de 4 km da secção em estudo. A montante desta confluência, a bacia do rio Este apresenta uma forma alongada, com um área de 32 km² e um comprimento de aproximadamente 13 km, recebendo ao longo deste percurso linhas de água de menor importância, pelo que uma chuvada intensa provocará uma onda de cheia caracterizada por um rápido aumento de caudal, seguido de um período de caudal estacionário, voltando, então, ao caudal inicial. Por sua vez, a bacia hidrográfica do Rio Veiga apresenta uma forma arredondada, com uma área de 25 km² e um comprimento de 7 km, recebendo várias linhas de água de importância semelhante. Assim, após uma chuvada forte em toda a bacia, prevê-se a ocorrência de cheias simultâneas nas várias linhas de água, que afluem à linha de água principal num curto intervalo de tempo, originando, na secção de jusante e em termos qualitativos, uma cheia de grande intensidade mas de curta duração.

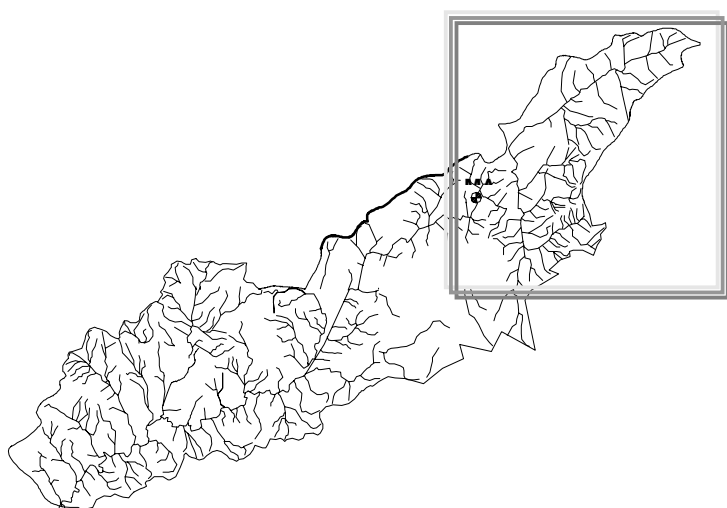


Figura 2a – Bacia hidrográfica do Rio Este

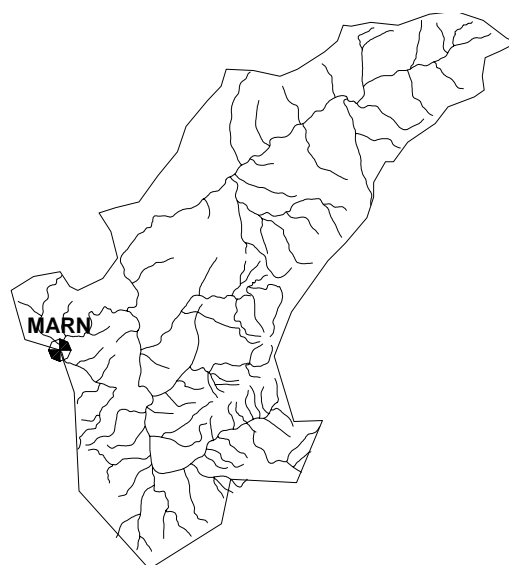


Figura 2b – Sub-bacia a montante do MARN

Na análise hidráulica efectuada, foi considerado um trecho localizado entre uma secção a jusante de um açude localizado sob a ponte de acesso auto-estrada A3 e uma secção coincidente com a ponte existente no caminho municipal que liga Vimieiro a Macada (Figura 3).



Figura 3 – Delimitação do trecho analisado .

Neste trecho do Rio Este as condições hidrodinâmicas do escoamento de cheias são fortemente influenciadas pelos aterros de aproximação às pontes situadas a jusante do local de construção da plataforma do MARN e cujos tabuleiros estão às cotas 118 m e 120 m. A capacidade de vazão das secções sob os tabuleiros é limitada, pelo que aqueles aterros funcionarão como obstáculos ao escoamento, condicionando o nível e extensão da área inundada a montante das respectivas secções. Na Figura 4 são ilustradas duas situações hidrodinâmicas distintas (caudal de cheia e caudal frequente) na designada *secção de jusante* (cota 120 m).



Figura 4.a) – Secção de jusante em situação de cheia (vistas para montante e jusante)



Figura 4.b) – Secção de jusante em situação de caudal frequente (vistas para montante e jusante)

METODOLOGIA

A informação topográfica teve como base o levantamento fornecido pela entidade promotora do MARN, complementado por várias visitas ao local, quer para confirmação dessa informação, quer para análise das condições a montante e a jusante da área em estudo.

No cálculo dos caudais de cheia foram escolhidos alguns métodos de natureza empírica, estatística e cinemática. A escolha dos métodos utilizados prendeu-se com os pressupostos que estiveram na origem de cada uma dos métodos, as suas condições de validade e os dados disponíveis à data do estudo.

As simulações hidrodinâmicas foram realizadas recorrendo a um modelo criado a partir dum programa, baseado no método dos elementos finitos, que permite simular escoamentos bidimensionais (no plano horizontal), com capacidade para reproduzir situações em que ocorrem de áreas descobertas no domínio de análise.

Os cenários foram definidos considerando um caudal mínimo de cheia, determinado no estudo hidrológico, e valores de caudal múltiplos de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, associados a períodos de retorno superiores e compatíveis com os condicionalismos de escoamento existentes. Para cada um dos cenários considerados nas simulações efectuadas, foram analisadas a situação inicial e a situação final (com a plataforma projectada à cota 124 m).

Na Figura 5 são apresentadas as malhas de elementos finitos adoptadas (Pinho et al., 1999) e a topografia do leito maior deste trecho do Rio Este, para as duas situações analisadas. Na delimitação apresentada foram apenas consideradas as áreas localizadas a cotas iguais ou inferiores a 124 m.

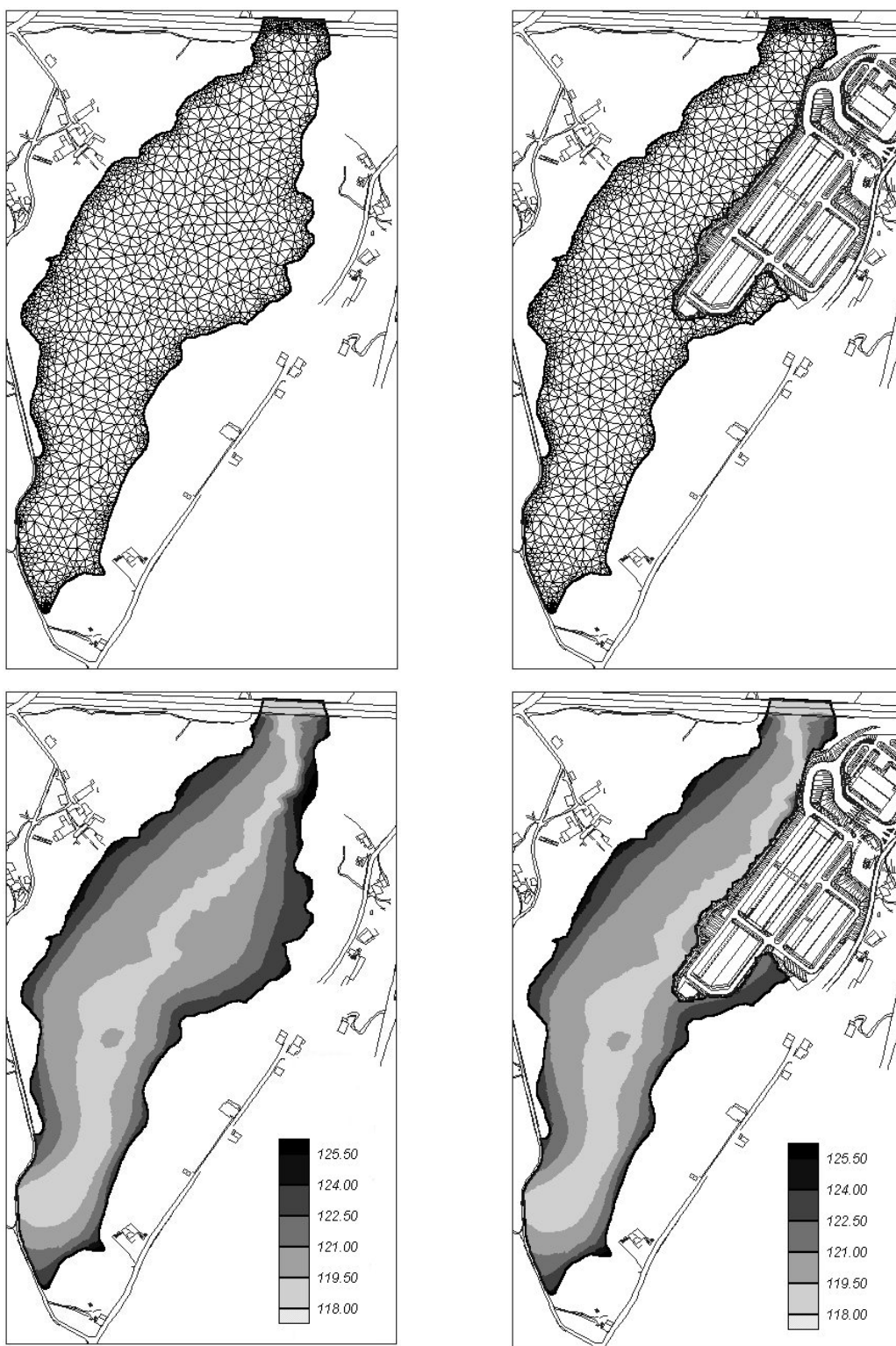


Figura 5 - Malha de elementos finitos e topografia do leito maior

Na Figura 6 são apresentados os postos udométricos e as respectivas áreas de influência na bacia hidrográfica do Rio Este, bem como os respectivos valores médios das precipitações anuais nos postos com maior área de influência na secção em estudo.

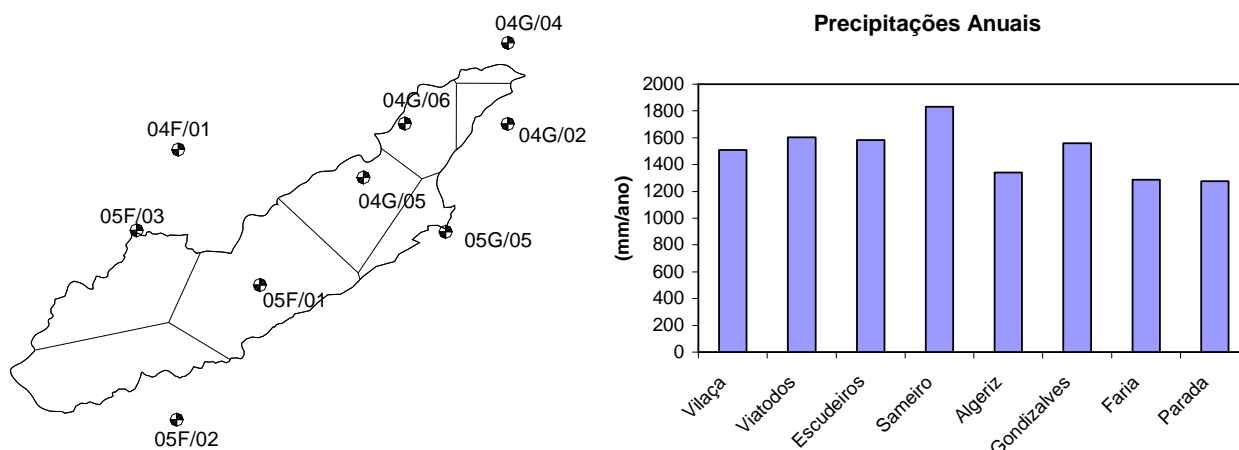


Figura 6 - Postos udométricos. Precipitação Média Anual

Os registos nos postos udométricos correspondem ao período de 1932 a 1994 para os postos de Viatodos e Sameiro, enquanto que para os restantes os valores apresentados referem-se ao período de 1980 a 1994. Como se pode verificar nos dados apresentados, a precipitação anual média na bacia hidrográfica do Rio Este vai decrescendo gradualmente desde a nascente, onde atinge o valor máximo de 1830 mm, até à secção em estudo, onde apresenta valores de 1510 mm. A precipitação anual média nesta bacia é de aproximadamente 1670 mm.

Para a caracterização das precipitações máximas foram utilizadas as curvas de intensidade-duração-frequência para a zona em estudo. No Quadro 1 são apresentadas as precipitações para diferentes tempos de precipitação e para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos.

Quadro 1 –Precipitações máximas (mm) na bacia do Rio Este

Duração (min.)	Período de Retorno (anos)		
	10	50	100
5	10,0	12,5	13,5
15	16,4	21,1	23,1
30	22,5	29,4	32,5
60	30,7	40,9	45,7
120	42,0	56,9	64,2
180	50,4	69,0	78,4
240	57,4	79,1	90,4
300	63,5	88,0	100,8
360	68,9	96,0	110,3
420	73,8	103,3	119,0
480	78,4	110,1	127,1
540	82,7	116,4	134,7
600	86,7	122,4	141,8

Caudais observados

Próximo da secção de confluência do Rio Este com o Rio Ave existe uma estação hidrométrica, em Ponte de Junqueira, com registos quer dos caudais médios diários, quer dos caudais máximos instantâneos observados. Nessa secção, a bacia hidrográfica apresenta um área de 245 km², estando disponíveis os registos referentes ao período de 1978 a 1989.

Na Figura 7 são apresentados os caudais médios diários cronológicos e os caudais médios diários classificados registados na secção de Ponte de Junqueira.

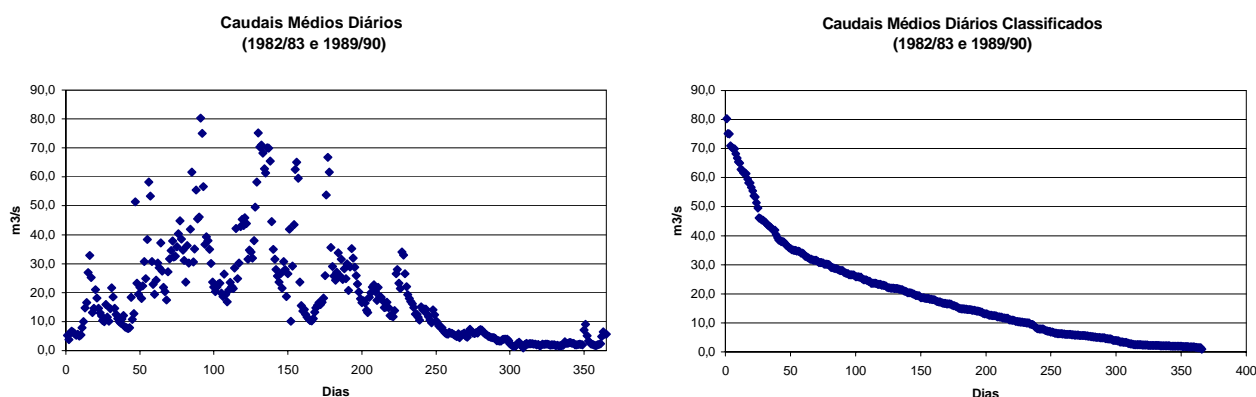


Figura 7 - Caudais médios diários anuais cronológicos e classificados

No Quadro 2 são apresentadas os caudais máximos instantâneos na secção de referência em Ponte da Junqueira, no período de 30-1-1978 a 21-11-1989.

Quadro 2 – Secção de Ponte de Junqueira: caudais máximos instantâneos

Data	Caudais (m ³ /s)
30-12-1978	87.99
26-03-1980	26.32
02-04-1981	26.17
31-12-1981	82.05
16-05-1983	37.21
01-04-1984	39.63
09-02-1985	81.87
17-02-1986	16.14
28-02-1987	50.41
06-02-1988	55.65
24-11-1989	43.24

Para a secção em estudo, a área da bacia corresponde a cerca de 25% da área da bacia referente à secção de Ponte de Junqueira e cerca de 26% em relação à área total da bacia do Rio Este.

Caudais de cheia

No cálculo dos caudais de cheia foram aplicados alguns métodos de origem empírica, estatística e cinemática.

As equações utilizadas nos métodos empíricos têm por base a experiência e os registos existentes, sendo unicamente função da área da bacia, não associando aos resultados uma probabilidade estatística de ocorrência. Esta, apesar de não quantificada, corresponde normalmente a valores muito baixos do período de recorrência (T). No Quadro 3 faz-se uma síntese dos valores obtidos por aplicação de cada um desses métodos.

Quadro 3 – Caudais de cheia: métodos empíricos

Método	Caudais de Cheia (m ³ /s)
SCIMEMI	310
ZAPATA	260
VALENTINI	550
GLEZ-QUIJANO	280
KUICHLING	180
GANGUILLET	125
ISOKOWSKI	120

O caudal específico calculado com base nestes métodos apresentados varia entre 1,8 m³/s/km² e 8,0 m³/s/km² com um valor médio de 3,9 m³/s/km², a que corresponde um caudal de cheia de aproximadamente 260 m³/s.

As equações utilizadas nos métodos estatísticos permitem relacionar o caudal de cheia com as características da chuvada que lhe dá origem, admitindo a mesma frequência de recorrência dos dois fenómenos. No Quadro 4 apresentam-se os valores dos caudais de cheia obtidos através da aplicação de dois métodos estatísticos.

Quadro 4 – Caudais de cheia: métodos estatísticos

Método	Caudais de Cheia (m ³ /s)		
	T = 10	T = 50	T = 100
GIANDOTTI	290	410	465
RACIONAL	165	230	260

No Quadro 5 apresenta-se os resultados obtidos através do método cinemático proposto por Loureiro e que foi desenvolvido para as bacias hidrográficas do Rio Ave e do Rio Cávado.

Quadro 5 – Caudais de cheia: método cinemático.

Método	Caudais de Cheia (m ³ /s)		
	T = 10	T = 50	T = 100
LOUREIRO	130	180	200

Estudos anteriores (HIDRO4, 1995) baseados na aplicação de outro método cinemático – o modelo *HEC1* do Hydrologic Engineering Center – estabeleceram os seguintes caudais de cheia: 117, 158 e 223 m³/s, respectivamente para períodos de recorrência de 10, 25 e 100 anos.

Da análise dos resultados obtidos para os caudais de cheia estimados através dos diferentes métodos de cálculo utilizados, verifica-se que os valores apresentam oscilações significativas. Atendendo a que os métodos cinemáticos consideram as condições de propagação das ondas de cheia, traduzindo situações mais próximas da realidade, considerou-se, na análise hidráulica, a ordem de grandeza dos caudais obtida por esses métodos. Assim, para a secção em estudo, será de esperar um caudal de cheia, com um tempo de recorrência de 10 anos, próximo de 23 m³/s.

ANÁLISE HIDRÁULICA

Neste estudo consideraram-se valores de caudais de cheia representativos do regime hidrológico da bacia. Assim, nas simulações efectuadas considerou-se um caudal de cheia mínimo de 25 m³/s na secção de montante do trecho em estudo, que poderá corresponder aos maiores caudais máximos instantâneos verificados na secção de Ponte de Junqueira no período de 1978 a 1989. Efectuaram-se ainda, outras simulações, correspondentes a valores de caudais de 50, 100 e 150 m³/s, associados a períodos de retorno superiores e compatíveis com os condicionalismos de escoamento existentes.

Nas Figuras 8 e 9 apresentam-se os resultados obtidos referentes a áreas inundadas e campos de velocidade para a situação inicial e para a situação de ocupação futura, correspondentes aos valores limite (inferior e superior) dos caudais simulados, ou seja, a 25 m³/s e 150 m³/s, respectivamente.

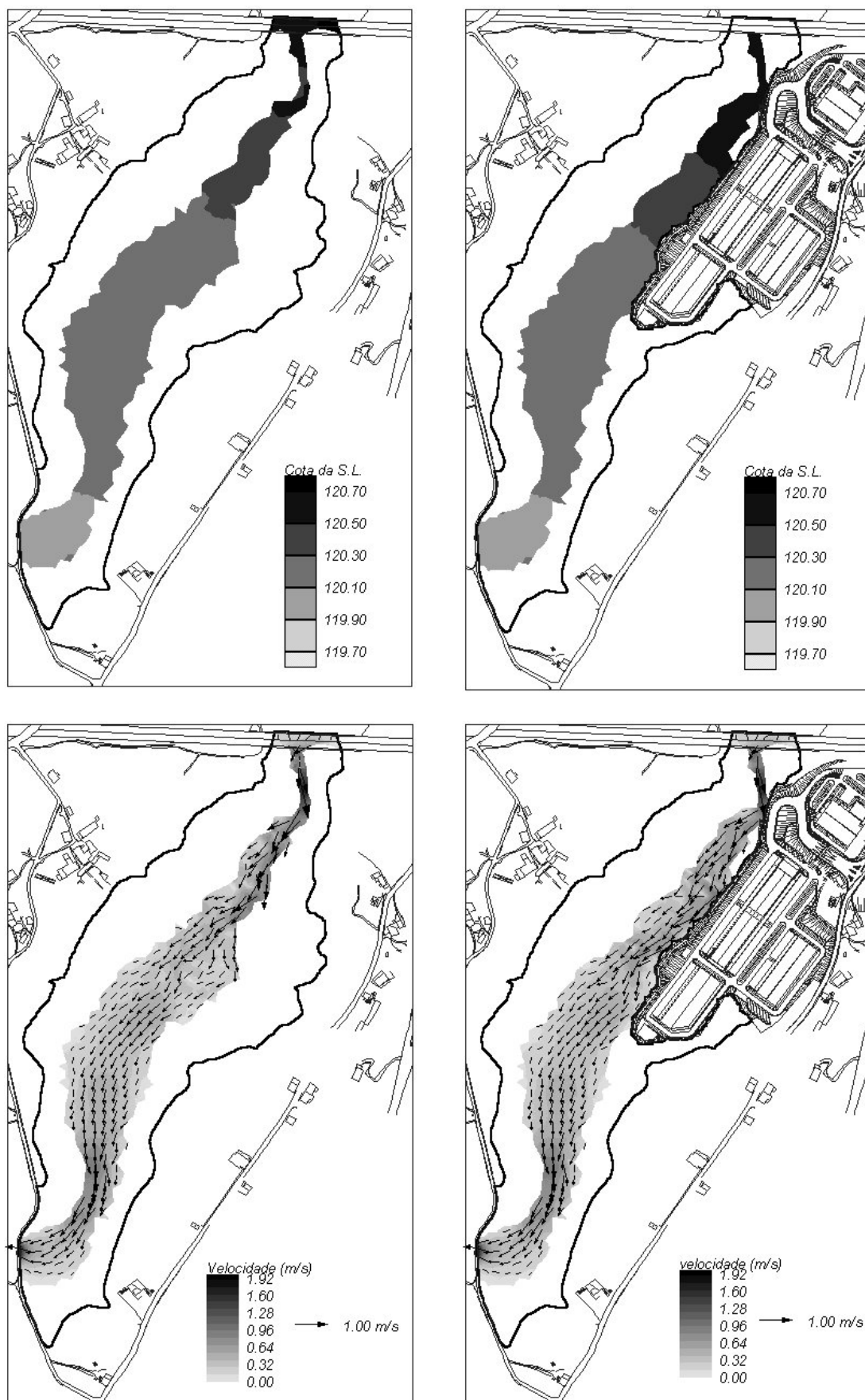


Figura 8 - Cotas da superfície livre e campo de velocidades (caudal de $25 \text{ m}^3/\text{s}$)

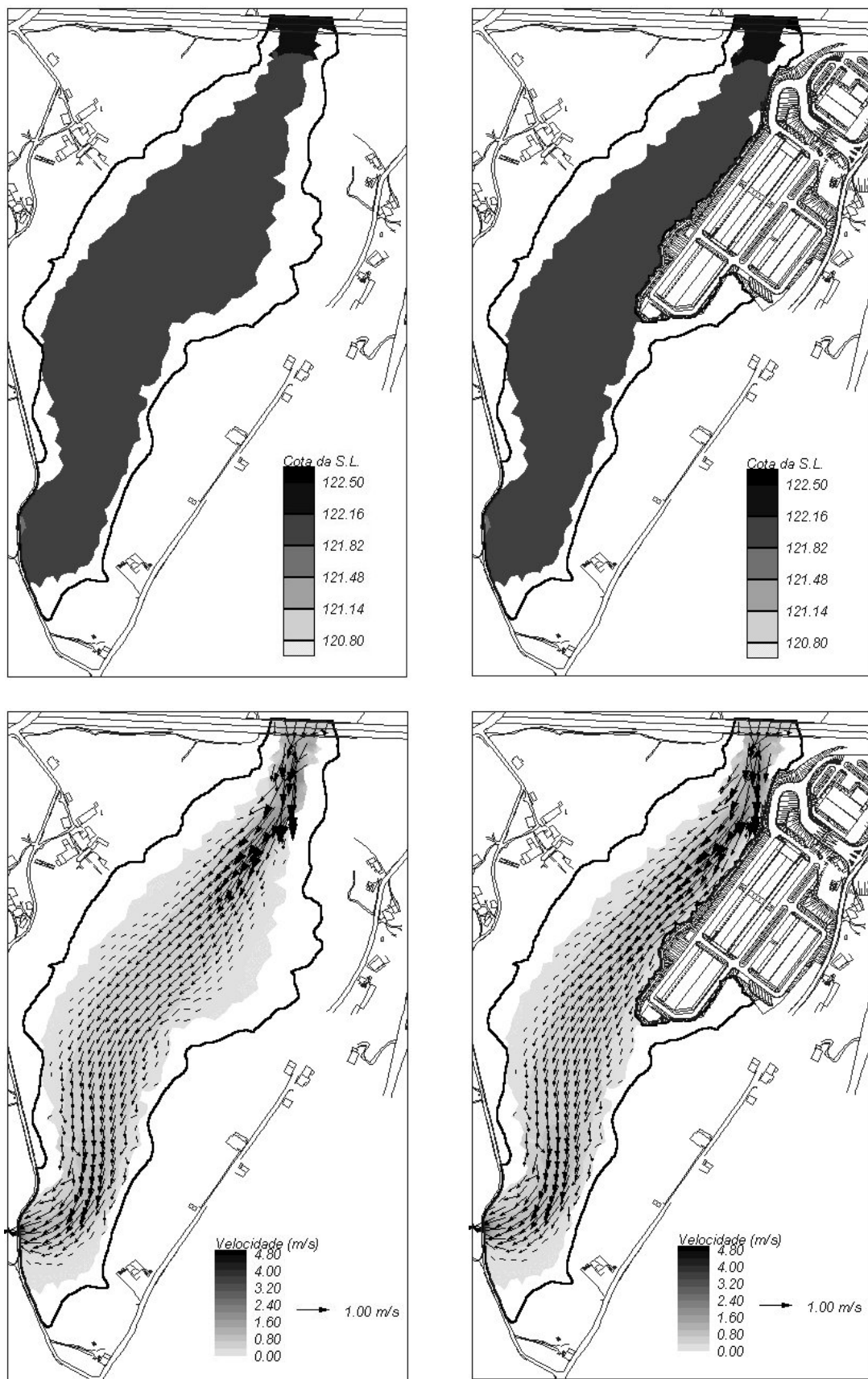


Figura 9 - Cotas da superfície livre e campo de velocidades (caudal de $150 \text{ m}^3/\text{s}$)

CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos permite concluir que a variação nas condições de escoamento devido à construção da plataforma do MARN não é muito significativa. De facto, para os caudais e condições consideradas nas simulações efectuadas, a área do leito de cheia ocupada pela plataforma é reduzida e corresponde a uma zona em que, na situação inicial, o escoamento se apresenta pouco intenso e com uma altura de água reduzida.

Os valores da velocidade do escoamento, correspondentes aos caudais de cheia associados aos períodos de retorno considerados no estudo hidrológico, permitirão calcular as respectivas tensões tangenciais, contribuindo para a selecção dos materiais mais adequados a utilizar na execução dos taludes do canal e, desse modo, para a minimização de eventuais acções erosivas na área de intervenção.

Com a determinação das diversas cotas alagáveis, este estudo contribuiu para a definição das cotas de segurança de plataformas para a totalidade do terreno, incluindo as destinadas a futuras ampliações do MARN. Por exemplo, a ocupação da margem direita do leito maior deste trecho do Rio Este, por uma eventual expansão do Mercado, revelou-se francamente desaconselhável.

Pela capacidade demonstrada em prever, com suficiente acuidade, a amplitude das áreas inundadas, bem como a grandeza das velocidades do escoamento em situações de cheia, a aplicação de modelos matemáticos bidimensionais constitui uma componente importante para a implementação dum futuro sistema de suporte à decisão para a gestão integrada desta bacia hidrográfica, nomeadamente na definição de sistemas de alerta associados à protecção civil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresas SIMAB–Sociedade Instaladora de Mercados Abastecedores, S.A. e ECAN/MARN – Mercado Abastecedor da Região do Noroeste, S.A. o apoio financeiro necessário para concretização deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

HIDRO4–Consultores de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Lda. (1995). *Análise das Condiçantes Hidrológicas, Hidráulicas e Ambientais do Entrepósito Comercial Agro-alimentar do Noroeste/ Mercado Abastecedor do Noroeste*, Lisboa, Portugal.

INAG-SNIRH (2000). <http://www.inag.pt/ggi-bin7snirh/snirh.tcl>

- Pinho J.L.S., Duarte A.A.L.S., Vieira, J.M.P., Carmo J.S.A. (1999). *Mesh Generation and Refinement in 2D Hydrodynamic Modelling. A Case Study*. EPMESCVII: Computational Methods in Engineering and Science, ed. Bento, J. et al., Elsevier Science, Ltd., Oxford, UK., Vol. 2, 1167-1176.
- Thomas H.E. and Schneider W.J. (1970). *Water as an urban resource and nuisance*. U.S. Geological Survey, Circular 601-D, Washington D.C., USA.
- US WES-HL, 1996. *Users Guide to RMA2 Version 4.3*, US Army Corps of Engineers - Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory. Vicksburg, USA.
- Vieira, J.M.P., Duarte A.A.L.S., Pinho J.L.S., Ramisio P.J.P. (2001). *Estudo de Incidências Ambientais e de Minimização dos Impactos Negativos do Mercado Abastecedor da Região Norte (MARN)*, Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, 42 pp. , Braga, Portugal.